

УДК 517.977.57

## МЕТОДИКА АНАЛИЗА РАБОТОСПОСОБНОСТИ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ

Ю.Л. Муромцев, А.Н. Грибков, А.В. Петров

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

E-mail: crems@crems.jesby.tstu.ru

Предложена методика использования взаимного расположения области существования решения задачи оптимального управления и множества полюсов в пространстве синтезирующих переменных для оценки работоспособности алгоритмического обеспечения систем энергосберегающего управления.

### Ключевые слова:

Оптимальное управление, когнитивная модель, метод синтезирующих переменных.

### Введение

Проектирование алгоритмического обеспечения систем энергосберегающего управления (СЭУ) объектами с несколькими входами представляет собой сложную задачу. Это обусловлено большим числом возможных видов функций оптимального управления (ОУ), сложностью построения областей существования различных видов функций ОУ в пространстве компонентов массива исходных данных задачи управления вследствие его высокой размерности, необходимостью разработки большого числа алгоритмов для расчета параметров функций ОУ и т. д. Решению этих вопросов посвящено множество работ авторов Л.С. Понтрягина, Р. Беллмана, А.А. Красовского.

Практика показывает, что основная доля отказов СЭУ в процессе эксплуатации связана с ошибками в определении ОУ или отсутствием решения задачи оптимального управления (ЗОУ) при введенных исходных данных, вследствие чего существенно снижается эффективность работы СЭУ [1]. Поэтому важно на этапе разработки алгоритмического обеспечения оценить его работоспособность. Для этого предлагается использовать взаимное расположение области существования решения ЗОУ и множества полюсов в пространстве синтезирующих переменных.

### 1. Математическая постановка задачи

Предлагаемый подход рассмотрим на примере задачи энергосберегающего управления линейным объектом с ограничением на управление  $u=(u_1, u_2)^T$ , закреплёнными концами вектора фазовых координат  $z=(z_1, z_2)^T$  и фиксированным временным интервалом  $[t_0, t_k]$ , т. е.

$$\begin{aligned} \dot{z} &= Az(t) + Bu(t), \quad t \in [t_0, t_k], \\ A &= \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \end{pmatrix}, \\ \forall t \in [t_0, t_k]: u_i(t) &\in [u_i^h, u_i^b] \quad i = 1, 2, \end{aligned} \quad (1)$$

причём  $|u_i^h| = u_i^b$ ,

$$\begin{aligned} z(t_0) &= (z_1^0, z_2^0)^T \rightarrow z(t_k) = (z_1^k, z_2^k)^T, \\ J_3 &= \int_{t_0}^{t_k} (u_1^2(t) + u_2^2(t)) dt \rightarrow \min. \end{aligned}$$

Здесь  $A, B$  – матрицы параметров модели динамики объекта;  $u_i^h, u_i^b$  – граничные значения управления  $u_i, i=1, 2$ ;  $J_3$  – минимизируемый функционал (суммарные затраты энергии).

Для численного решения задачи (1), в частности определения оптимальных значений

$$u_i^*(t), \quad z_i^*(t), \quad i = 1, 2, \quad t \in [t_0, t_k] \quad \text{и} \quad J_3, \quad (2)$$

задаётся массив исходных данных

$$R = (A, B, u_1^h, u_1^b, u_2^h, u_2^b, z_1^0, z_2^0, z_1^k, z_2^k, t_0, t_k). \quad (3)$$

Такого рода задачи типичны для управления динамическими режимами многозонных электрических печей, многосекционных сушильных установок и других энергоёмких объектов.

### 2. Анализ работоспособности алгоритмического обеспечения систем энергосберегающего управления

Представлять результаты анализа ОУ в пространстве с размерностью, соответствующей размерности массива исходных данных  $R$ , исключительно громоздко и ненаглядно. В целях сокращения размерности массива (3) и использования метода синтезирующих переменных вместо исходной задачи (1) с натуральным масштабом переменных  $u_i(t), i=1, 2$  и  $t$  будем выполнять анализ базовой (нормированной) задачи с нормированным временем  $T \in [0; 2]$  и управлением [2]

$$\bar{U}(T) = (U_1(T), U_2(T))^T, \quad U_i(T) \in [-1; 1], \quad i = 1, 2.$$

Базовая ЗОУ записывается в виде

$$\begin{aligned} \dot{\bar{Z}} &= \bar{A}\bar{Z}(T) + \bar{B}(\bar{U}(T) + \Delta\bar{U}), \quad T \in [0; 2], \\ \bar{A} &= \|\bar{a}_{ij}\|_{2 \times 2}, \quad \bar{B} = \|\bar{b}_i\|_{2 \times 2}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \forall T \in [0; 2]: U_i(T) \in [-1; 1], \quad i = 1, 2, \\ Z(T=0) = Z^0 = (Z_1^0, Z_2^0)^T \rightarrow Z(T=2) = \\ = Z^k = (Z_1^k, Z_2^k)^T, \end{aligned}$$

$$\bar{J}_3 = \int_0^2 ((U_1(T) + \Delta U_1)^2 + (U_2(T) + \Delta U_2)^2) dT \rightarrow \min,$$

$$\text{здесь } \bar{a}_{ij} = \frac{1}{2} \Delta t a_{ij}, \quad \bar{b}_i = \frac{1}{4} \Delta t \Delta u_i b_i,$$

$$\begin{aligned} \Delta t = t_k - t_0, \quad \Delta u_i = u_i^h - u_i^h, \\ T = 2 \frac{t - t_0}{\Delta t}, \quad U_i(T) = 2 \frac{u_i(t) - \bar{u}_i}{\Delta u_i}, \quad \bar{u}_i = \frac{1}{2} (u_i^h + u_i^b), \\ \Delta U_i = \frac{u_i^h + u_i^b}{\Delta u_i}, \quad i = 1, 2. \end{aligned}$$

Для решения базовой задачи (4) задаётся массив исходных данных

$$\bar{R} = (\bar{A}, \bar{B}, \bar{Z}^0, \bar{Z}^k). \quad (5)$$

В массиве  $\bar{R}$  можно выделить две группы компонентов – базовые и оперативные. Базовые компоненты характеризуют конструктивные и другие свойства объекта, значения которых в процессе эксплуатации в основном остаются постоянными. К этим компонентам относятся  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$ . Оперативные компоненты ( $\bar{Z}^0, \bar{Z}^k$ ), а также  $\Delta t$  обычно изменяются при каждом новом решении задачи. В основе анализа ЗОУ лежат следующие положения.

**Утверждение 1.** Существование решения базовой задачи (4) для задаваемых исходных данных (5), а также вид и параметры функции ОУ, если решение ЗОУ существует, однозначно определяются значением вектора синтезирующих переменных  $L = (L_1, L_2)$ , компоненты которого определяются по формулам

$$\begin{aligned} L_i = z_i^k - \sum_{j=1}^2 \bar{f}_{ij}(2) z_j^0, \quad i = 1, 2, \quad (6) \\ \|\bar{f}_{ij}(2)\| = \frac{1}{2\sqrt{D}} \times \\ \times \begin{pmatrix} (\bar{a}_{22} + \bar{\beta})e^{-2\bar{\beta}} - (\bar{a}_{22} + \bar{\alpha})e^{-2\bar{\alpha}} & \bar{a}_{21}(e^{-2\bar{\alpha}} - e^{-2\bar{\beta}}) \\ \bar{a}_{12}(e^{-2\bar{\alpha}} - e^{-2\bar{\beta}}) & (\bar{a}_{11} + \bar{\beta})e^{-2\bar{\beta}} - (\bar{a}_{11} + \bar{\alpha})e^{-2\bar{\alpha}} \end{pmatrix}, \\ \bar{\alpha} = \frac{\Delta t}{2} \alpha, \quad \bar{\beta} = \frac{\Delta t}{2} \beta, \quad \bar{D} = \frac{\Delta t^2}{4} D, \\ D = \frac{(a_{11} + a_{22})^2}{4} + a_{12}a_{21} - a_{11}a_{22}, \\ \alpha = -\frac{1}{2}(a_{11} + a_{22}) - \sqrt{D}, \\ \beta = -\frac{1}{2}(a_{11} + a_{22}) + \sqrt{D}. \end{aligned}$$

Доказательство утверждения следует из покомпонентной записи условия

$$z^k - e^{2\bar{A}} z^0 = \int_0^2 e^{\bar{A}(2-T)} \bar{B}(\bar{U}(T) + \Delta \bar{U}) dT.$$

### Определение 1. Пространство

$$L_0 = (L_1, L_2, \bar{\alpha}, \bar{\beta}, \bar{b}_1, \bar{b}_2)$$

будем называть общим, а его сечение с координатными осями  $L_1, L_2$ , т. е.  $L = (L_1, L_2)$ , – синтезирующим сечением.

**Определение 2.** Область  $L_c$  синтезирующего сечения  $L$ , в точках которой существует решение базовой ЗОУ (4) и каждой точке соответствует определённое управление  $\bar{U}(T)$ , называется областью существования.

**Утверждение 2.** Если точка  $l = (l_1, l_2)$  в пространстве  $L_0$ , рассчитанная по значениям компонентов массива  $\bar{R}$ , принадлежит области  $L_c$  (значение  $\bar{D} > 0$ ), то ей могут соответствовать следующие виды функций ОУ:

- $\bar{U}(T/D, D_2)$  – функция имеет два параметра  $D_1, D_2$ ;
- $\bar{U}(T/T_n)$  – в качестве параметра функции используется время переключения  $T_n$ ;
- $\bar{U}(T/D, T_n)$  – функция содержит три параметра  $D_i, i=1, 2$  и  $T_n$ ;
- $\bar{U}(T/\%1)$  – функция ОУ принимает граничные значения управления  $[-1; 1]$ ;
- $\bar{U}(T/\%1; D, T_n)$  – одна компонента ОУ располагается на границе, а другая содержит параметры  $D_i$  и (или)  $T_n$ .

Доказательство утверждения 2 следует из рассмотрения видов функций отдельных компонентов и их возможных комбинаций.

**Определение 3.** Описание топологии области существования  $L_c$  содержит три группы объектов – подобласти  $L_u$  различных видов функций ОУ, границы  $l_p$  между областями и полюса точки  $l_n$ , представляющие собой пересечения границ.

**Определение 4.** Графическое представление области  $L_c$  с её объектами будем называть когнитивной моделью (КгМ) результатов анализа ЗОУ.

Фрагмент когнитивной модели при  $\bar{\alpha} = -0,118$ ,  $\bar{\beta} = 2,118$ ,  $\bar{b}_1 = 550$ ,  $\bar{b}_2 = 220$ , содержащий часть граничных линий показан на рисунке, а, при  $\bar{\alpha} = 0,254$ ,  $\bar{\beta} = 0,946$ ,  $\bar{b}_1 = 704$ ,  $\bar{b}_2 = 176$  – на рисунке, б.

**Утверждение 3.** Граница области  $L_c$  образована множествами линий  $l_p^c$  и полюсов  $l_n^c$ , при этом для реальных объектов управления (значения  $u_i$  ограничены, объекты обладают инерцией) множества  $l_p^c$  и  $l_n^c$  содержат по четыре компонента.

Доказательство утверждения 3 непосредственно вытекает из рассмотрения границ при скалярном управлении  $u$ .

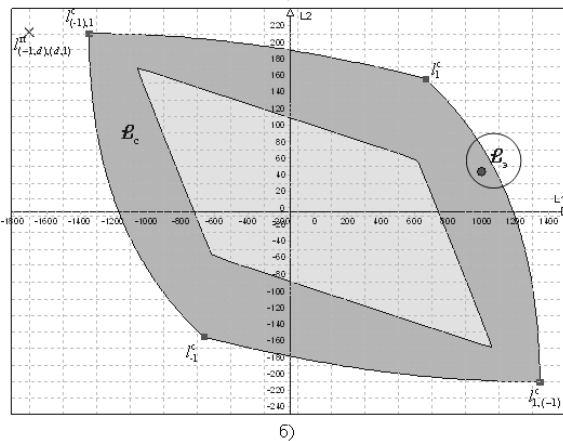
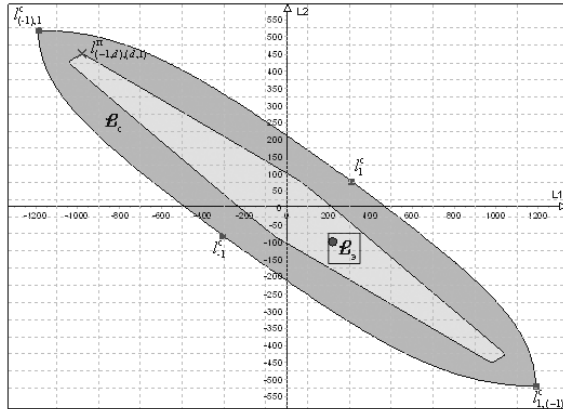
**Следствие утверждения 3.** Полюса множества  $l_n^c = \{l_1^c, l_{-1}^c, l_{1,(-1)}^c, l_{(-1),1}^c\}$  соответствуют следующим видам ОУ

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= (U_1(T) = 1, U_2(T) = 1), \\ \bar{U}_{-1} &= (U_1(T) = -1, U_2(T) = -1), \\ \bar{U}_{1,(-1)} &= (U_1(T) = 1, U_2(T) = -1), \\ \bar{U}_{(-1),1} &= (U_1(T) = -1, U_2(T) = 1). \end{aligned}$$

Расположение четырёх полюсов множества  $I_{\pi}^c$  показано на рисунке.

**Определение 5.** Полюса, входящие в множество полюсов  $I_{\pi}^c$ , будем называть постоянными полюсами существования.

Наряду с полюсами  $I_{\pi}^c$  для рассматриваемой ЗОУ имеют место полюса, которые в зависимости от значений массива  $R$  могут располагаться как внутри области  $L_c$  (в этом случае решение ЗОУ существует), так и вне области  $L_c$  (решение ЗОУ не существует).



**Рисунок.** Область существования решения задачи  $L_c$  и область значений вектора  $L$  при эксплуатации  $L_s$  для ситуаций:  $L_c \subset L_s$  (а) и  $L_c \not\subset L_s$  (б)

**Определение 6.** Полюса  $I_i^c$ , которые в зависимости от значений  $R$  могут принадлежать или не принадлежать области  $L_c$ , будем называть переменными.

Например, переменными являются полюса  $I_{(-1,d),(d,1)}^n$ ,  $I_{(-1,d),(-d,1)}^n$ , здесь полюсу  $I_{(-1,d),(d,1)}^n$  соответствует функция ОУ

$$\bar{U}_{(-1,d),(d,1)} = (U_1(0) = -1,$$

$$U_1(T) = D_{1\alpha} e^{\bar{\alpha}T} + D_{1\beta} e^{\bar{\beta}T}, T \in (0, 2];$$

$$U_2(T) = D_{2\alpha} e^{\bar{\alpha}T} + D_{2\beta} e^{\bar{\beta}T}, T \in [0, 2), \quad U_2(2) = 1),$$

а полюсу  $I_{(-1,d),(-d,1)}^n$

$$\bar{U}_{(-1,d),(-d,1)} = (U_i(0) = -1,$$

$$U_i(T) = D_{i\alpha} e^{\bar{\alpha}T} + D_{i\beta} e^{\bar{\beta}T}, \quad T \in (0, 2], i = 1, 2),$$

где

$$D_{1\alpha} = \frac{\bar{b}_1}{2\sqrt{\bar{D}}} [-(\bar{a}_{22} + \bar{\alpha})D_1 - \bar{a}_{21}D_2], \quad (7)$$

$$D_{1\beta} = \frac{\bar{b}_1}{2\sqrt{\bar{D}}} [(\bar{a}_{22} + \bar{\beta})D_1 - \bar{a}_{21}D_2], \quad (8)$$

$$D_{2\alpha} = \frac{\bar{b}_2}{2\sqrt{\bar{D}}} [-(\bar{a}_{11} + \bar{\alpha})D_2 - \bar{a}_{12}D_1], \quad (9)$$

$$D_{2\beta} = \frac{\bar{b}_2}{2\sqrt{\bar{D}}} [(\bar{a}_{11} + \bar{\beta})D_2 - \bar{a}_{12}D_1]. \quad (10)$$

**Утверждение 4.** Если решается ЗОУ (1), то при расчёте ОУ  $\bar{U}(T)$ , соответствующих переменным полюсам, имеет место

а)

$$D_1 = \begin{cases} \frac{1}{\bar{b}_1}, & \text{если } \bar{U}^0 \in \left\{ \bar{U}_{1^u, 1^u}^0, \bar{U}_{1^u, -1^u}^0, \bar{U}_{1^u, 1^k}^0, \right. \\ & \left. \bar{U}_{1^u, -1^k}^0, \bar{U}_{(1^u, -1^k), 0}^0, \bar{U}_{(1^u, 1^k), 0}^0 \right\}, \\ -\frac{1}{\bar{b}_1}, & \text{если } \bar{U}^0 \in \left\{ \bar{U}_{-1^u, -1^u}^0, \bar{U}_{-1^u, 1^u}^0, \bar{U}_{-1^u, -1^k}^0, \right. \\ & \left. \bar{U}_{-1^u, 1^k}^0, \bar{U}_{(-1^u, 1^k), 0}^0, \bar{U}_{(-1^u, -1^k), 0}^0 \right\} \end{cases}$$

и (11)

$$D_2 = \begin{cases} \frac{1}{\bar{b}_2}, & \text{если } \bar{U}^0 \in \left\{ \bar{U}_{1^u, 1^u}^0, \bar{U}_{-1^u, 1^u}^0, \bar{U}_{-1^k, 1^u}^0, \right. \\ & \left. \bar{U}_{1^k, 1^u}^0, \bar{U}_{0, (1^u, -1^k)}^0, \bar{U}_{0, (1^u, 1^k)}^0 \right\}, \\ -\frac{1}{\bar{b}_2}, & \text{если } \bar{U}^0 \in \left\{ \bar{U}_{-1^u, -1^u}^0, \bar{U}_{1^u, -1^u}^0, \bar{U}_{1^k, -1^u}^0, \right. \\ & \left. \bar{U}_{-1^k, -1^u}^0, \bar{U}_{0, (-1^u, 1^k)}^0, \bar{U}_{0, (-1^u, -1^k)}^0 \right\}; \end{cases}$$

б)

$$D_1 = \begin{cases} \left( \frac{1}{\bar{b}_1} - \frac{1}{\bar{b}_2} \bar{f}_{12}(2) \right) / \bar{f}_{11}(2), & \text{если } \bar{U}_{1^k, 1^u}^0, \\ \left( \frac{1}{\bar{b}_1} + \frac{1}{\bar{b}_2} \bar{f}_{12}(2) \right) / \bar{f}_{11}(2), & \text{если } \bar{U}_{1^k, -1^u}^0, \\ (1 + \bar{f}_{22}(2)) / \bar{b}_2 \bar{f}_{21}(2), & \text{если } \bar{U}_{0, (-1^u, 1^k)}^0, \\ (1 - \bar{f}_{22}(2)) / \bar{b}_2 \bar{f}_{21}(2), & \text{если } \bar{U}_{0, (1^u, 1^k)}^0, \\ (-1 - \bar{f}_{22}(2)) / \bar{b}_2 \bar{f}_{21}(2), & \text{если } \bar{U}_{0, (1^u, -1^k)}^0, \\ (-1 + \bar{f}_{22}(2)) / \bar{b}_2 \bar{f}_{21}(2), & \text{если } \bar{U}_{0, (-1^u, -1^k)}^0 \end{cases}$$

и (12)

$$D_2 = \begin{cases} \left( \frac{1}{\bar{b}_2} + \frac{1}{\bar{b}_1} \bar{f}_{21}(2) \right) / \bar{f}_{22}(2), & \text{если } \bar{U}_{(-1^u), 1^k}^0, \\ \left( -\frac{1}{\bar{b}_2} + \frac{1}{\bar{b}_1} \bar{f}_{21}(2) \right) / \bar{f}_{22}(2), & \text{если } \bar{U}_{(-1^u), (-1^k)}^0, \\ (1 + \bar{f}_{11}(2)) / \bar{b}_1 \bar{f}_{12}(2), & \text{если } \bar{U}_{(-1^u, 1^k), 0}^0, \\ (-1 - \bar{f}_{11}(2)) / \bar{b}_1 \bar{f}_{12}(2), & \text{если } \bar{U}_{(1^u, -1^k), 0}^0, \\ (-1 + \bar{f}_{11}(2)) / \bar{b}_1 \bar{f}_{12}(2), & \text{если } \bar{U}_{(-1^u, -1^k), 0}^0, \\ (1 - \bar{f}_{11}(2)) / \bar{b}_1 \bar{f}_{12}(2), & \text{если } \bar{U}_{(1^u, -1^k), 0}^0; \end{cases}$$

здесь

$$\begin{aligned}
 \bar{U}_{1^{1^h}, 1^{1^h}}^0 : U_1(T) &= \begin{cases} 1, & T = 0, \\ \hat{U}_1(T), & T \in (0, 2], \end{cases} \\
 U_2(T) &= \begin{cases} 1, & T = 0, \\ \hat{U}_2(T), & T \in (0, 2]; \end{cases} \\
 &\dots \\
 \bar{U}_{(1^{1^h}, -1^k), 0}^0 : U_1(T) &= \begin{cases} 1, & T = 0, \\ \hat{U}_1(T), & T \in (0, 2), \\ -1, & T = 2, \end{cases} \\
 U_2(T) &= \hat{U}_2(T), \quad T \in (0, 2] \text{ и т. д.} \\
 \hat{U}_1(T) &= \bar{b}_1(D_1 \bar{f}_{11}(T) + D_2 \bar{f}_{12}(T)), \\
 \hat{U}_2(T) &= \bar{b}_2(D_1 \bar{f}_{21}(T) + D_2 \bar{f}_{22}(T)), \quad (13) \\
 D_1 &= \frac{\begin{vmatrix} L_1 & \bar{b}_1^2 \phi_{11,11} + \bar{b}_2^2 \phi_{12,22} \\ L_2 & \bar{b}_1^2 \phi_{21,12} + \bar{b}_2^2 \phi_{22,22} \end{vmatrix}}{\Delta}, \\
 D_2 &= \frac{\begin{vmatrix} \bar{b}_1^2 \phi_{11,11} + \bar{b}_2^2 \phi_{12,21} & L_1 \\ \bar{b}_1^2 \phi_{21,11} + \bar{b}_2^2 \phi_{22,21} & L_2 \end{vmatrix}}{\Delta}, \\
 \Delta &= \begin{vmatrix} \bar{b}_1^2 \phi_{11,11} + \bar{b}_2^2 \phi_{12,21} & \bar{b}_1^2 \phi_{11,11} + \bar{b}_2^2 \phi_{12,22} \\ \bar{b}_1^2 \phi_{21,11} + \bar{b}_2^2 \phi_{22,21} & \bar{b}_1^2 \phi_{21,12} + \bar{b}_2^2 \phi_{22,22} \end{vmatrix}, \\
 \phi_{ij,j\mu} &= \int_0^2 \bar{f}_{ij}(2-T) \bar{f}_{i\mu}(T), \\
 \|\bar{f}_{ij}(2-T)\| &= \frac{1}{2\sqrt{D}} \times \\
 &\times \begin{pmatrix} (\bar{a}_{22} + \bar{\beta})e^{-\bar{\beta}(2-T)} - (\bar{a}_{22} + \bar{\alpha})e^{-\bar{\alpha}(2-T)} & \bar{a}_{21}(e^{-\bar{\alpha}(2-T)} - e^{-\bar{\beta}(2-T)}) \\ \bar{a}_{12}(e^{-\bar{\alpha}(2-T)} - e^{-\bar{\beta}(2-T)}) & (\bar{a}_{11} + \bar{\beta})e^{-\bar{\beta}(2-T)} - (\bar{a}_{11} + \bar{\alpha})e^{-\bar{\alpha}(2-T)} \end{pmatrix}, \\
 \|\bar{f}_{ij}(T)\| &= \frac{1}{2\sqrt{D}} \times \\
 &\times \begin{pmatrix} (\bar{a}_{22} + \bar{\beta})e^{\bar{\beta}T} - (\bar{a}_{22} + \bar{\alpha})e^{\bar{\alpha}T} & \bar{a}_{21}(e^{\bar{\alpha}T} - e^{\bar{\beta}T}) \\ \bar{a}_{12}(e^{\bar{\alpha}T} - e^{\bar{\beta}T}) & (\bar{a}_{11} + \bar{\beta})e^{\bar{\beta}T} - (\bar{a}_{11} + \bar{\alpha})e^{\bar{\alpha}T} \end{pmatrix}. \quad (14)
 \end{aligned}$$

При доказательстве утверждения 4 используются соотношения (13) и (14) при  $T=2$ .

**Следствие утверждения 4.** Используя соотношения (11), (12) для  $D_1, D_2$  координаты полюсов определяются по формулам

$$\begin{aligned}
 l_1 &= D_1(\bar{b}_1^2 \phi_{11,11} + \bar{b}_2^2 \phi_{12,21}) + D_2(\bar{b}_1^2 \phi_{11,12} + \bar{b}_2^2 \phi_{12,22}), \\
 l_2 &= D_1(\bar{b}_1^2 \phi_{21,11} + \bar{b}_2^2 \phi_{22,21}) + D_2(\bar{b}_1^2 \phi_{21,12} + \bar{b}_2^2 \phi_{22,22}).
 \end{aligned}$$

Например, для  $\bar{U}_{1^{1^h}, -1^{1^h}}^0$  используя (11), (13) и (14) получаем

$$\begin{aligned}
 l_1 &= \bar{b}_1 \phi_{11,11} + \frac{\bar{b}_2^2}{\bar{b}_1} \phi_{12,21} - \frac{\bar{b}_1^2}{\bar{b}_2} \phi_{11,12} - \bar{b}_2 \phi_{12,22}, \\
 l_2 &= \bar{b}_1 \phi_{21,11} + \frac{\bar{b}_2^2}{\bar{b}_1} \phi_{22,21} - \frac{\bar{b}_1^2}{\bar{b}_2} \phi_{21,12} - \bar{b}_2 \phi_{22,22}.
 \end{aligned}$$

Работоспособность алгоритмического обеспечения СЭУ в основном зависит от того насколько значительно могут изменяться компоненты массива исходных данных (5) в процессе реальной эксплуатации. В результате изменения любого из компонентов в соответствии с формулой (6) меняются значения вектора синтезирующих переменных  $L$ . Множеству различных значений  $L$  соответствует некоторая область  $L_s$ , охватывающая значения  $L$ , которые могут иметь место при эксплуатации. Если область  $L_s$  не выходит за пределы  $L_c$ , то при любых значениях массива  $R$ , встречающихся при эксплуатации, алгоритмическое обеспечение позволяет определить вид и рассчитать параметры ОУ.

### 3. Методика анализа работоспособности

В предположении, что в массиве исходных данных (5) компоненты  $\bar{A}, \bar{B}$  сохраняются постоянными, а могут изменяться только  $Z^0, Z^k$  методика анализа работоспособности алгоритмического обеспечения СЭУ, решающей задачу (1), заключается в следующем.

1. Используя рассмотренный математический аппарат строится когнитивная модель, отражающая анализ решений ЗОУ (1). Наиболее важными компонентами модели являются полюса и границы области существования решения задачи, а также полюса и границы, соответствующие наиболее вероятным видам функций ОУ.
2. На основе анализа предполагаемых режимов работы объекта управления в процессе эксплуатации определяются диапазоны  $\Delta z_i^0, \Delta z_i^k, i=1,2$ , в которых могут изменяться начальные и конечные значения вектора фазовых координат.
3. Используя соотношения (6) выполняются вычисления множества точек для  $l=\{l_k, k=1, N\}$  синтезирующего сечения  $L$ , где  $N$  – количество рассматриваемых точек (режимов эксплуатации). Множество  $l$  должно включать как значения внутри интервалов  $\Delta z_i^0, \Delta z_i^k$ , так и возможные сочетания на границах интервалов.
4. На основе множества точек  $l$  строится область  $L_s$ , отражающая возможные значения вектора  $L=(L_1, L_2)$  при эксплуатации объекта.
5. Выполняется сопоставительный анализ взаимного расположения областей  $L_s$  и  $L_c$ . При этом возможны следующие основные случаи.
  - 5.1. Область  $L_c$  содержит  $L_s$ , т. е.  $L_s \subseteq L_c$  (рисунок, а). В этом случае при любых исходных данных ЗОУ алгоритмическое обеспечение позволит рассчитать оптимальные управляющие воздействия.

Если область  $L_3$  располагается во внутренней части  $L_c$ , которая на рисунок, *a* выделена прямыми линиями, то этому соответствуют один вид функций ОУ

$$U_i(T) = D_{i\beta} e^{\beta T} + D_{i\alpha} e^{\alpha T}, \quad i = 1, 2,$$

параметры для которого рассчитываются по формулам (7), (8), (9) и (10). В этом случае алгоритмическое обеспечение СЭУ является наиболее простым.

- 5.2. Часть области  $L_3$  находится за пределами области существования  $L_c$  (рисунок, *b*). В этом случае для точек  $l_k \notin L_c$  решение ЗОУ не существует и возникают проблемы, связанные с выработкой управления, которое не обеспечит выполнение условия  $z(t_k) = z^*$ .

Здесь возможно решение обратной задачи, заключающейся в том, чтобы определить насколько надо изменить интервалы  $\Delta z_i^0$ ,  $\Delta z_i^*$ ,  $i=1,2$  для обеспечения выполнения условия  $L_3 \subseteq L_c$ .

#### Выводы

Применение методики использования взаимного расположения области существования решения ЗОУ и множества полюсов в пространстве синтезирующих переменных позволяет оценить работоспособность алгоритмического обеспечения и повысить эффективность функционирования СЭУ. Особенно актуально это для систем, точки режимов эксплуатации которых могут выходить за пределы области существования решения задачи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муромцев Ю.Л. Методология полного анализа энергосберегающего управления многомерными объектами // Системы управления и информационные технологии. – 2008. – № 2.3 (32). – С. 364–369.
2. Муромцев Д.Ю. Методы и алгоритмы синтеза энергосберегающего управления технологическими объектами. – Тамбов; М.; СПб.; Баку; Вена: Изд-во «Нобелистика», 2005. – 202 с.

Поступила 03.04.2009 г.

УДК 004.418

## ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

А.Н. Виноградов, С.А. Даниельян, Р.С. Кузнецов, В.П. Чипулис

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток  
E-mail: chipulis@dvo.ru

*Рассмотрены проблемы построения и перспективы развития информационно-аналитических систем в теплоэнергетике. Показаны примеры реализации и описаны функциональные возможности эксплуатируемых в настоящее время систем. Сделан акцент на аналитической обработке измерительной информации, накопленной в процессе функционирования систем.*

#### Ключевые слова:

Информационно-аналитическая система, объект теплоэнергетики, автоматизированное рабочее место.

В последнее десятилетие отмечается интенсивный процесс внедрения информационно-измерительных систем в теплоэнергетике. Он обусловлен возможностями современной измерительной базы, позволяющей не только выполнять измерения в полном объеме и с высокой точностью, но и передавать их в компьютер с помощью разнообразных телекоммуникационных средств. Выполняемые в этом направлении разработки совместного коллектива сотрудников института автоматики и процессов управления ДВО РАН и инжиниринговой компании «ВИРА» отличаются тем, что в них существенный акцент делается на обработку результатов измерений с ориентацией на потребности технических специалистов, управленческого персонала, а также представителей административных и финансовых служб.

Одной из необходимых предпосылок для решения проблемы энергосбережения является внедрение на объектах теплоэнергетики (ОТЭ) систем технологического и коммерческого учета тепловой энергии. Выделим и далее будем рассматривать два класса ОТЭ – потребителей и источников тепловой энергии. В настоящий период, в отличие от последних десятилетий прошлого века, общепризнана экономическая целесообразность установки на объектах-потребителях приборов учета тепловой энергии. Эти приборы, как правило, позволяют существенно сократить расходы на оплату потребляемых ресурсов и тем самым создают стимулы для реализации мер по их экономии. Постепенно также приходит понимание необходимости пополнения и модернизации контрольно-измерительно-